

文章编号: 1006-2467(2023)01-0001-09

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.499

随机环境下电动汽车充电实时管理与优化控制算法

刘迪迪¹, 杨益菲¹, 杨玉荟¹, 邹艳丽¹, 王小华¹, 黎新²

(1. 广西师范大学 电子与信息工程学院, 广西壮族自治区 桂林 541004;

2. 广西电网有限责任公司电力科学研究院, 南宁 530000)

摘要: 电动汽车的规模日益壮大, 对其充电行为进行自适应管理成为亟待解决的问题. 从充电服务商的角度出发, 协同可再生能源和储能设备, 并计及电网的时变电价和电动汽车充电可容忍时延, 基于 Lyapunov 优化理论提出随机环境下的电动汽车充电实时管理和优化控制算法, 旨在最大化充电服务商的利益, 即最小化购电成本. 理论性能分析证明, 所提算法无需可再生能源出力、充电需求和时变电价的先验统计信息, 就能使优化目标趋近最优值. 仿真结果表明, 该算法可以有效减少充电服务商的购电成本, 相比于基准贪婪算法可降低 27.3%.

关键词: 电动汽车; 充电调度; 随机环境; 智能电网; 可再生能源

中图分类号: TM 734

文献标志码: A

Management and Optimal Control Algorithm for Electric Vehicle Charging in Random Environment

LIU Didi¹, YANG Yifei¹, YANG Yuhui¹, ZOU Yanli¹, WANG Xiaohua¹, LI Xin²

(1. College of Electronic and Information Engineering, Guangxi Normal University, Guilin 541004,

Guangxi Zhuang Autonomous Region, China; 2. Power Research Institute of

Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530000, China)

Abstract: With the increasing scale of electric vehicles (EVs), the adaptive management of its charging behavior becomes an urgent problem to be solved. From the point of view of charging service provider, an online management algorithm for EV charging is proposed based on the Lyapunov optimization theory under the random environment in this paper, considering renewable sources energy, storage equipment, time-varying electricity price, and the tolerable delay of EV, with an aim of maximizing the benefits of charging service providers (i. e., minimizing the cost of electricity purchased). The performance of the proposed algorithm is analyzed to verify that it can achieve near-optimal optimization results without any a priori statistical information about the system inputs (renewable energy generation, charging demand, and time-varying electricity price). The simulation results show that the proposed algorithm can effectively reduce the economic cost by 27.3% compared with the benchmark algorithm.

Key words: electric vehicles (EVs); charging schedule; smart grid; random environment; renewable energy source

收稿日期: 2021-12-07 修回日期: 2022-02-12 录用日期: 2022-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(62061006, 12162005)

作者简介: 刘迪迪(1980-), 副教授, 博士, 主要研究方向为电力系统控制、随机网络优化.

通信作者: 王小华, 副教授; E-mail: wxh@gxnu.edu.cn.

近年来,在环境问题和“双碳”战略的驱动下,可再生能源和电动汽车(Electric Vehicle, EV)规模不断壮大,从而受到广泛关注^[1-2].然而,可再生能源固有的间歇性使得其在并网时增加了电网运行的压力^[3];同时,大规模的电动汽车无序地并入智能电网进行充电可能加大智能电网峰谷差,增加配电系统网损,进而影响智能电网的稳定性和安全性^[4-5].因此,如果将电动汽车作为可控负载,对其充电行为进行有效调度和管理,不仅可以降低电动汽车并网带来的负面影响^[6],而且能进一步缓解可再生能源出力的强波动性给电网造成的不稳定性^[7].

目前,国内外学者就电动汽车充放电调度管理主要从电网、EV 用户和充电服务商 3 个角度开展研究.基于电网角度的研究主要考虑电动汽车并入电网之后导致的电网不稳定问题,通过对电动汽车直接调度,以最小化电网的总负荷波动优化电网的运行^[8-10],并不适用于如今大规模的电动汽车调度管理现状.基于 EV 用户角度的研究旨在减少车主充电成本或减缓电池的寿命衰减,但可能造成可再生能源浪费^[11-13].

而电动汽车与智能电网之间的桥梁,即充电站,能够聚集大量的电动汽车,可实现统筹规划电动汽车的调度问题.文献[14]提出由聚合商管理者把电动汽车的充电调度分为日前和实时两个阶段,日前阶段对总体充电电量和备用容量进行优化,实时阶段对电动汽车充电功率进行分配调度,最后对收益进行结算,但是缺少对用户需求延迟满意度的考虑.文献[15]以通勤车的固定运行时间和路线为背景,充电站协同可再生能源和储能设备,对充电站的购电成本进行优化,但该算法仅局限于通勤电动汽车的充电调度,没有普适性.文献[16]基于智能电网-充电站的两层充电架构,提出了一种考虑用户满意度和配网安全的电动汽车多目标双层充电优化模型与方法.文献[17]考虑充电站与智能电网之间的电力交易,以达到充电站利益最大的目的,但没有考虑储能设备对抑制分布式可再生能源并网对电网造成的不稳定性.文献[18]综合考虑用户的充电需求和电网负荷水平,提出一种基于动态分时电价的电动汽车充电站有序充电控制方法,但该算法未考虑可再生能源并网.以上研究均需要提前知晓 EV 用户的用车信息,且需要可再生能源的出力预测等,算法复杂度较高.

本文从充电服务商的角度出发,协同可再生能源和储能设备,并计及电网的时变电价、可再生能源出力随机性和电动汽车充电可容忍时延,提出随机

环境下的电动汽车充电实时管理和优化控制算法,其中可再生能源发电出力、电网电价等均为随机过程,概率分布未知.通过实时控制电动汽车的充电速率、调节储能设备的充/放电以及与智能电网的双向电力交易,在满足电动汽车的充电需求的同时,最大化自身的利益.利用 Lyapunov 的优化理论,所提算法不需要可再生能源出力、电动汽车需求和智能电网实时电价的统计分布信息,复杂度较低,普遍适应性好.

1 模型构建

充电服务商对电动汽车充电调度管理的模型如图 1 所示.其中, $g(t)$ 为智能电网与充电服务商之间 t 时隙的电力交易量, $H(t)$ 为 t 时隙充电站配备的可再生能源收集装置的发电量, $b(t)$ 为储能设备 t 时隙的充/放电量, $a_i(t)$ 为电动汽车 i 在 t 时隙的充电需求量, $i = 1, 2, \dots, N$; $d(t)$ 为充电站在 t 时隙分配给所有电动汽车的总充电量

$$d(t) = \sum_{n=1}^N d_n(t)$$

该电动汽车充电站配备包括可再生能源发电设备(光伏电板或风力发电设备),并兼有储能设备,以应对可再生能源发电出力的随机性.同时充电站通过智能电表与智能电网连接,利用智能电表获取智能电网的实时电价信息.当电车与充电桩连接时,充电服务商可以获取电动汽车的充电信息,如所需充电

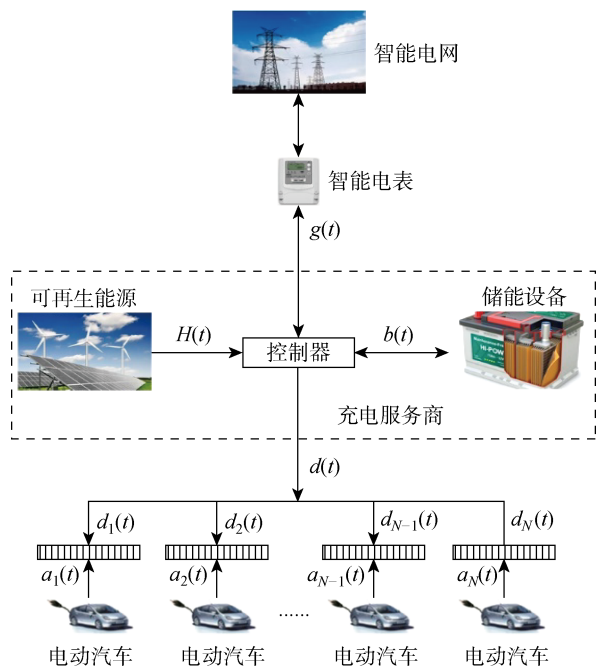


图 1 电动汽车充电调度管理模型

Fig. 1 Management model of EV charging scheduling

电量、可容忍最长充电时长等。充电站的控制器根据当前可再生能源的出力情况、储能设备里的电量和智能电网的电价,实时控制电动汽车的充电速率、储能设备的充/放电以及与智能电网的双向电力交易量,以最大化充电站的利益,即最小化购电成本。

1.1 电动汽车的充电需求队列模型

当电动汽车连接充电桩时,充电服务商首先获取电动汽车的充电信息^[13],可以用 6 元组 $(i, s_i, s'_i, f_i, f'_i, W_{\max})$ 来表示,其中 s'_i 为预期结束充电时间, f_i 为电动汽车 i 充电前的电荷量, f'_i 为充电结束时的预期电荷量, W_{\max} 为电动汽车的最大充电速率。根据这些充电信息,充电服务商的控制器可获知电动汽车 i 的最大充电时长 $S_i = s'_i - s_i$ 和总充电需求量 $F_i = f'_i - f_i$,以及充电需求量 $a_i(t)$ 。 $a_i(t)$ 可通过以下方法求得,例如,电动汽车在一个时隙间隔 Δt 内的最大充电量为 $W_{\max} \Delta t$,假设 1 辆电动汽车总充电需求为 $11 \text{ kW} \cdot \text{h}$, $W_{\max} = 3 \text{ kW} \cdot \text{h}$, $\Delta t = 1 \text{ h}$,那么该电动汽车至少需要 4 个时隙来完成充电任务,前 3 个时隙的充电需求量为 $3 \text{ kW} \cdot \text{h}$,第 4 个时隙的充电需求量为 $2 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。若该电动汽车的起始充电时间为 22:00,预计结束时间为次日 6:00,则可接受的最大充电时延为 4 个时隙。电动汽车 i 在充电期间的累计时延不得超过该电动汽车允许的最大充电时延。

假设 t 时隙充电桩 n 的充电需求量为 $a_n(t)$,进入充电需求队列 n (与充电桩一一对应) 中,并以先进先出的方式等待被服务,用 $Q_n(t)$ 表示队列 n 中 t 时隙的充电需求积压,那么 $Q_n(t)$ 更新可表示为

$$Q_n(t+1) = \max\{Q_n(t) - d_n(t), 0\} + a_n(t) \quad (1)$$

1.2 电力供需模型

充电站收集的可再生能源可以由控制器直接提供给电动汽车充电,当发电量小于总充电量,即 $H(t) < d(t)$ 时,充电服务商可以选择从智能电网购电或储能设备放电;当 $H(t) > d(t)$ 时,充电服务商可以选择将富余电量出售给智能电网或存入储能设备供以后时隙使用。若电力交易量 $g(t) < 0$,则表示充电服务商售电给智能电网;反之则表示充电服务商从智能电网购买电量。若储能设备 t 时隙的充/放电量 $b(t) > 0$,则表示储能设备放电;反之则表示储能设备充电。由电动汽车充电调度管理模型可知,任意时隙 t 该充电站内电力的供需平衡关系满足:

$$d(t) = H(t) + g(t) + b(t) \quad (2)$$

受硬件电路最大电流的限制,任意时隙储能设备的充/放电量 $b(t)$ 以及与电网之间的交易电量

$g(t)$ 均不超过最大值,即有

$$\left. \begin{aligned} |b(t)| &\leq b_{\max} \\ |g(t)| &\leq g_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

假设 t 时隙智能电网的电价为 $P(t)$, $0 < P(t) \leq P_{\max}$, P_{\max} 为任意时隙电价的最大值。则此时隙充电服务商的购电成本为 $P(t)g(t)$ 。

1.3 储能设备模型

充电站的储能设备 t 时隙的电量记为 $B(t)$,则储能设备的电量更新为

$$B(t+1) = B(t) - b(t) \quad (4)$$

用 B_{\max} 表示储能设备的最大容量,则充电桩控制器通过控制决策变量 $b(t)$,使得任意时隙储能设备中的电量满足:

$$B_{\min} \leq B(t) \leq B_{\max} \quad (5)$$

式中: B_{\min} 为不减少储能设备使用寿命应具有的最少电量,低于该值则会因过度放电而缩短储能设备寿命,简化为 $B_{\min} = 0$; B_{\max} 为储能设备存储容量最大值,高于该值则电量因无法存入而造成能量浪费。

2 问题规划及求解

基于以上模型,充电站根据每个充电桩当前充电需求队列的积压 $Q_n(t)$ 、储能设备里的当前电量 $B(t)$ 、智能电网的当前电价 $P(t)$ 和可再生能源装置发电量 $H(t)$,决策当前时隙储能设备充/放电量 $b(t)$ 、智能电网的电力交易量 $g(t)$ 和分配给每个充电桩的电量 $d_n(t)$,目标是在满足电动汽车充电需求(充电时延不超过用户可容忍时限)的前提下,寻找最优决策变量 $(g(t), b(t), d_n(t))$ 的时间序列,最小化充电服务商的长期购电成本,该问题规划为

$$\min_{g(t), b(t), d_n(t)} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T E(P(t)g(t)) \quad (6)$$

$$\text{s. t. 式(1) ~ (5)}$$

$$0 \leq d_n(t) \leq d_{n, \max} \quad (7)$$

$$\bar{Q}_n < \infty, \forall n \quad (8)$$

$$0 \leq \delta_{n, i} \leq \delta_{n, i}^{\max} \quad (9)$$

式中: $E(\cdot)$ 为数学期望,通过决策最优变量 $(g(t), b(t), d_n(t))$ 的时间序列,使充电服务商的长期购电成本最小; $d_{n, \max}$ 为队列 n 任意时隙可被分配充电量的最大值, $a_{n, \max}$ 为任意时隙充电需求的最大值,为保证以上问题可行,有 $d_{n, \max} \geq a_{n, \max}$; $\delta_{n, i}$ 为队列 n 中的电动汽车 i 在充电期间的累计时延, $\delta_{n, i}^{\max}$ 为该电动汽车允许的最大充电时延,下文将引入虚拟队列解决队列的延时约束问题^[19]。式(6)为优化目标,式(8)保证所有的充电需求队列保持稳定。

2.1 构建虚拟队列保证延迟约束

定义虚拟队列 $Z_n(t)$, $Z_n(t)$ 的队列更新为

$$Z_n(t+1) =$$

$$\max\{Z_n(t) - d_n(t) + \epsilon_n 1_{\{Q_n(t) > 0\}}, 0\} \quad (10)$$

式中: $1_{\{Q_n(t) > 0\}}$ 为一个指示变量, 若 $Q_n(t) > 0$, 其值为 1, 否则其值为 0; 常数 ϵ_n 表示对虚拟队列积压的惩罚, 用于调节虚拟队列 $Z_n(t)$ 的增长速度, 在实队列 $Q_n(t)$ 非空时, 虚拟队列 $Z_n(t)$ 每个时隙到达 ϵ_n , 而虚拟队列的服务速率与实队列相同, 均为 $d_n(t)$.

充电桩 n 在 t 时隙的时延为 $\delta_n(t)$, 则给出以下引理.

引理 1 在本模型中, 要保持实队列和虚拟队列稳定, 则各队列积压均有上界, 即 $Q_n(t) \leq Q_{n, \max}$, $Z_n(t) \leq Z_{n, \max}$, 那么队列 n 中任意时隙充电需求的服务时延最大值为

$$\delta_{n, \max} \triangleq \frac{Q_{n, \max} + Z_{n, \max}}{\epsilon_n} \quad (11)$$

引理 1 表明, 如果队列 $Q_n(t)$ 和 $Z_n(t)$ 具有有限的上界, 那么就可以保证 $Q_n(t)$ 中任意时隙充电需求的服务时延都不超过 $\delta_{n, \max}$. 引理 1 的证明可参考 Lyapunov 优化理论^[20].

2.2 Lyapunov 优化框架

利用 Lyapunov 理论解决式(6)~(9)中的问题. 为满足问题规划中的约束式(5), 即 $0 \leq B(t) \leq B_{\max}$, 将构造一个变量 $X(t)$, 表示为

$$X(t) = B(t) - VP_{\max} - b_{\max} \quad (12)$$

式中: V 为控制参数, 通过合理调节参数 V 来控制变量 $X(t)$, 以保证储能设备中的电量保持在合理的水平, 即 $0 \leq B(t) \leq B_{\max}$. 由储能设备的电量更新式(4)可得出 $X(t)$ 的更新方程为

$$X(t+1) = X(t) - b(t) \quad (13)$$

定义一个矢量 $\Theta(t) \triangleq [Q(t) \ Z(t) \ X(t)]$, 即矢量 $\Theta(t)$ 为实队列的矢量 $Q(t) = [Q_1(t) \ Q_2(t) \ \dots \ Q_n(t)]$, 虚拟队列的矢量 $Z(t) = [Z_1(t) \ Z_2(t) \ \dots \ Z_n(t)]$ 和 $X(t)$ 的联合矢量, 则 Lyapunov 函数可构造为

$$L(\Theta(t)) \triangleq$$

$$\frac{1}{2} \left(\sum_{n=1}^N Q_n(t)^2 + \sum_{n=1}^N Z_n(t)^2 + X(t)^2 \right) \quad (14)$$

那么一个时隙的 Lyapunov 漂移函数为

$$\Delta L(\Theta(t)) \triangleq$$

$$E\{L(\Theta(t+1)) - L(\Theta(t)) \mid \Theta(t)\} \quad (15)$$

Lyapunov“漂移加惩罚”表示为

$$\{\Delta L(\Theta(t)) + VE(P(t)g(t)) \mid \Theta(t)\} \quad (16)$$

式中: 第一项 $\Delta L(\Theta(t))$ 为 Lyapunov 漂移, 表示队

列积压的情况; 第二项为“惩罚”, 即充电服务商的购电成本. 若只最小化第一项, 则队列积压小即充电等待时延较小, 但会导致惩罚较大即充电服务商的购电成本增加; 若只最小化第二项, 则可实现充电服务商购电成本最小化, 但有可能无法保证电动汽车的充电需求在可容忍时限内得到满足. 因此式(6)~(9)的求解则转变为最小化队列积压和惩罚的加权和, 这样才能在充电等待时延不超过可容忍时延当前情况下, 实现充电服务商的购电成本最小化.

引理 2 “漂移加惩罚”表达式满足以下不等式:

$$\{\Delta L(\Theta(t)) + VE(P(t)g(t)) \mid \Theta(t)\} \leq$$

$$C + \sum_{n=1}^N Q_n(t) E\{a_n(t) - d_n(t) \mid \Theta(t)\} + \sum_{n=1}^N Z_n(t) E\{\epsilon_n - d_n(t) \mid \Theta(t)\} - X(t) E\{b(t) \mid \Theta(t)\} + VE\{P(t)g(t) \mid \Theta(t)\} \quad (17)$$

式中:

$$C = \frac{1}{2} \left(\sum_{n=1}^N (d_{n, \max}^2 + a_{n, \max}^2) + \sum_{n=1}^N \max\{\epsilon_n^2, d_{n, \max}\} + b_{\max}^2 \right) \quad (18)$$

引理 2 的证明参考 Lyapunov 优化理论^[20].

2.3 实时优化算法

利用 Lyapunov 理论框架, 将待求解的问题转化为最小化每个时隙的“漂移加惩罚”, 该表达式有界, 从而等效于最小化每个时隙的不等式(17)右边的各项. 除去决策变量 $b(t)$, $d_n(t)$, $g(t)$ 的无关项, 式(6)~(9)的求解可转化为

$$\begin{aligned} \min_{b(t), d_n(t), g(t)} & \left(VP(t)g(t) - X(t)b(t) - \sum_{n=1}^N (Q_n(t) + Z_n(t))d_n(t) \right) \\ \text{s. t.} & \text{式(2), (3), (7)} \end{aligned} \quad (19)$$

式(19)是一个求解带有约束条件的线性函数最小值问题, 可采用线性规划的方法求解.

由约束条件式(2)变形后带入式(19), 则有

$$\begin{aligned} \min_{b(t), d_n(t), g(t)} & \left(VP(t)(d(t) - H(t) - b(t)) - \sum_{n=1}^N (Q_n(t) + Z_n(t))d_n(t) - X(t)b(t) \right) \end{aligned} \quad (20)$$

将 $d(t) = \sum_{n=1}^N d_n(t)$ 代入式(20), 去除决策变量的无关项, 整理可将上述问题规划改写成线性规划的标准形式:

$$\min_{b(t), d_n(t)} \left(\sum_{n=1}^N (VP(t) - Q_n(t) - Z_n(t)) d_n(t) - (X(t) + VP(t)) b(t) \right) \quad (21)$$

$$\text{s. t. } \left. \begin{array}{l} 0 < d_n(t) \leq d_{n,\max} \\ |b(t)| \leq b_{\max} \end{array} \right\} \quad (22)$$

利用线性规划可求 t 时隙问题的最优解,即求出 t 时隙队列 n 电动汽车充电量的最优值 $d_n^*(t)$ 和储能设备充/放电的最优值 $b^*(t)$,再利用式(2)得出充电供应商与智能电网之间的最优交易电量 $g^*(t)$. 然后更新各队列 $t+1$ 时隙的值,重复以上方法得到最优决策的时间序列,所提算法如下所示.

算法: 电动汽车充电管理和优化控制

1. 初始化: $P_{\max}, b_{\max}, d_{n,\max}, \epsilon_n, B_{\max}, B(1) = 0, Q_n(1) = 0, Z_n(1) = 0, V, T, N$, 购电成本 $\text{SumPr} = 0$

2. for $t = 1: 1: T$

观测系统状态 $B(t), H(t), P(t), a_n(t)$

$X(t) = B(t) - VP_{\max} - b_{\max}$

线性规划求解:

$$\min_{b(t), d_n(t)} \left(\sum_{n=1}^N (VP(t) - Q_n(t) - Z_n(t)) d_n(t) - (X(t) + VP(t)) b(t) \right)$$

求得 t 时隙最佳决策变量 $b^*(t)$ 和 $d_n^*(t)$:

$$d^*(t) = \sum_{n=1}^N d_n^*(t)$$

$$g^*(t) = d^*(t) - H(t) - b^*(t)$$

累积购电成本 $\text{SumPr} = \text{SumPr} + P(t)g^*(t)$

储能设备电量更新 $B(t+1) = B(t) - b^*(t)$

构造的变量更新 $X(t+1) = X(t) - b^*(t)$

for $n = 1: 1: N$

实队列更新 $Q_n(t+1) = \max\{Q_n(t) - d_n^*(t), 0\} + a_n(t)$

虚队列更新 $Z_n(t+1) = \max\{Z_n(t) - d_n^*(t) + \epsilon_n \mathbf{1}_{\{Q_n(t) > 0\}}, 0\}$

end

end

可见,本文基于 Lyapunov 优化理论所得算法是一种实时在线算法. 该算法仅需根据当前环境状态 $(B(t), H(t), P(t), Q_n(t), Z_n(t), X(t))$ 就能做出最佳决策 $(g^*(t), b^*(t), d_n^*(t))$, 易于实现、复杂度低,且不依赖于可再生能源出力、电网时变电价和电动汽车的充电需求的统计分布知识.

3 算法性能的理论分析

首先从理论上对所提算法的性能进行分析和证明.

定理 1 在时隙 $t \in \{0, 1, \dots, T-1\}$ 上,任意常数 V 满足 $0 \leq V \leq V_{\max}$:

$$V_{\max} = \frac{B_{\max} - 2b_{\max}}{P_{\max} - P_{\min}} \quad (23)$$

式中: P_{\min} 为最小电价. 则上述算法具有以下性质.

性质 1 队列 $Q_n(t), Z_n(t)$ 在所有时隙都有上确界:

$$Q_n(t) \leq VP_{\max} + a_{n,\max} \quad (24)$$

$$Z_n(t) \leq VP_{\max} + \epsilon_n \quad (25)$$

$$Q_n(t) + Z_n(t) \leq VP_{\max} + a_{n,\max} + \epsilon_n \quad (26)$$

性质 2 充电需求队列中任何充电需求的最大时延为

$$\delta_{n,\max} \triangleq \frac{VP_{\max} + a_{n,\max} + \epsilon_n}{\epsilon_n} \quad (27)$$

性质 3 队列 $X(t)$ 有上下界:

$$-VP_{\max} - b_{\max} \leq X(t) \leq B_{\max} - VP_{\max} - b_{\max} \quad (28)$$

由此可保证储能设备的电量约束满足

$$0 \leq B(t) \leq B_{\max}$$

性质 4 如果 $H(t), d(t), P(t)$ 在时隙上独立同分布,则在上述算法下的平均期望购电成本与最优解的差不超过 C/V , 即

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T E(P(t)g(t)) \geq C^{\text{opt}} - \frac{C}{V} \quad (29)$$

式中: C^{opt} 为总购电成本的时间平均的最优值; C 值可由式(18)给出. 定理 1 的证明参考 Lyapunov 优化理论^[20].

由定理 1 的性质 1 和 2 可知,各队列 $Q_n(t), Z_n(t)$ 在任意时隙都有上确界;再根据引理 1 得知,该算法可保证式(6)~(9)中的约束式(8)和式(9)总是成立的,即满足汽车充电需求的服务时延不超过最大时限 $\delta_{n,\max}$. 性质 2 和 4 表明充电需求队列中任何充电需求的最大服务时延 $\delta_{n,\max}$ 随着控制参数 V 的增大而增大,而充电服务商的购电成本(目标函数)随着参数 V 的增大无限趋近于最优值 C^{opt} ,因此充电服务商可根据用户的容忍时延折中选取参数 V . 由性质 2 可知,为了减少充电需求的最大服务时延 $\delta_{n,\max}, \epsilon_n$ 的取值应尽可能大,但一般不超过充电需求的均值 $E(a_n(t))$,若给定充电需求的均值,则可取 $\epsilon_n = E(a_n(t))$. 性质 3 表明了充/放电决策 $b(t)$ 的合理性,使得储能设备的电量始终保持在合理水平,即 $B_{\min} \leq B(t) \leq B_{\max}$,不会因过度放电造

成储能设备的寿命缩短,也不会因电池容量有限造成能量浪费.

4 仿真验证

从仿真方面验证所提算法的有效性,基于 MATLAB 平台进行仿真验证. 所提算法不依赖于可再生能源的收集和电动汽车充电需求的统计分布,为便于演示,假设可再生能源的收集服从泊松分布,对于其他统计分布,该算法也同样适用. 经市场调研,发现工业电价在 0.5~2.0 元波动,该仿真时间间隔 Δt 取 10 min,时长为 10 d,共 1 440 个时隙,并参考市面上的储能设备容量范围进行仿真,具体参数如表 1 所示.

表 1 仿真参数
Tab. 1 Parameters of simulation

参数	取值
时隙间隔/min	10
总时隙数	1 440
电价/元	0.5~2.0
b_{\max} /kJ	1 000
能量收集	泊松分布
平均每个时隙能量收集/kJ	5 000
储能设备容量/kJ	4 500
V	1 400

为进一步验证所提算法的有效性,将所提算法和“purchase-at-deadline”贪婪算法以及没有储能设备的算法进行比较. “purchase-at-deadline”算法是指当充电站在指定期限内只消耗可再生能源,若最后期限还未能满足电动汽车的充电需求时,则从智能电网购买电量以满足充电需求,此处设置最大期限为 8 个时隙. 没有储能设备的场景中,当可再生能源有富余时,则将富余的可再生能源卖给智能电网,以降低充电服务商的购电成本. 基于 3 种算法充电服务商 10 d 的购电累计成本(C_{10})对比情况如图 2 所示. 图中,基于所提算法的充电服务商购电成本最低,“purchase-at-deadline”算法次之,没有储能设备的算法购电成本最高,分别为 343 元、447 元和 472 元;相比之下,基于所提算法购电成本分别降低了 23.3%和 27.3%,因此所提算法的性能最好.

可再生能源的出力具有不可控性和随机性,为了充分验证所提算法的普适性,即不受可再生能源出力影响的能力,设置可再生能源出力均值分别为 3 000,4 000,5 000 kJ 共 3 种情况,在 3 种情况下进行仿真,结果如图 3 所示. 图中, H_{av} 为发电量 $H(t)$

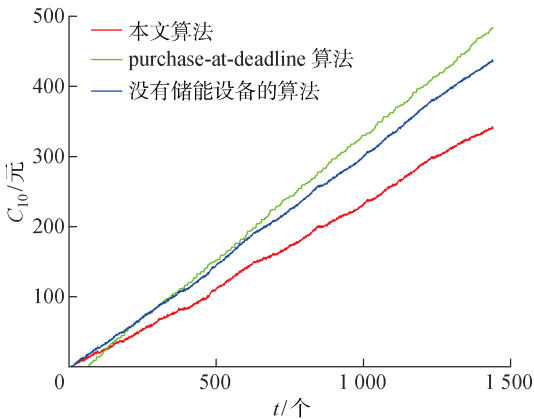


图 2 Lyapunov 优化算法与其余方法对比
Fig. 2 Comparison of Lyapunov optimization algorithm and other methods

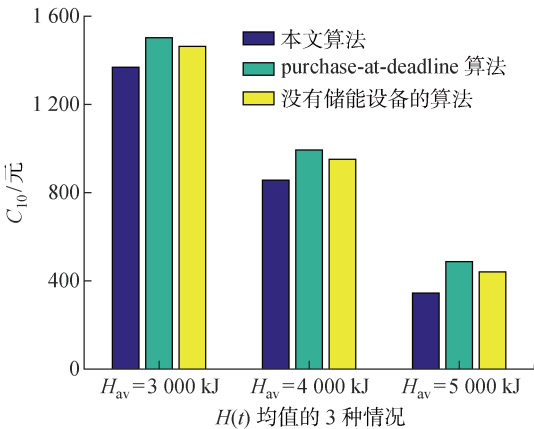


图 3 可再生能源 3 种情况的充电服务商购电成本比较
Fig. 3 Cost comparison of charging service providers in three cases of renewable energy

的均值. 从图 3 可看出,可再生能源发电量越多,充电站的购电成本越低;无论可再生能源出力均值处于什么水平,基于所提算法充电站购电成本比其他两种算法均低. 结果表明,本文所提算法具有较好的普适性,不依赖于可再生能源出力的概率分布,能够较好解决随机环境下电动汽车的充电调度问题.

为验证调节参数 V 对所提算法性能的影响,图 4 给出了充电服务商 10 d 的购电成本随 V 值的变化情况. 当 $850 < V < 1 400$ 时,购电成本随 V 值的增大而减小,这与算法性能理论分析(定理 1)中的性质 4 相符;在当前参数设置下,由理论分析结果式 (23)求得 $V_{\max} \approx 1 400$,从图 4 可看出,当 $V > 1 400$ 时,购电成本趋于平稳,这是因为调节参数 V 在降低购电成本的同时改变了储能设备里的电量水平,无限制增大 V 值,储能设备受最大容量 B_{\max} 的限制,不能存储过多电量,导致购电成本无明显下降.

图 5 为储能设备的实时电量(H_{RT} ,此时 $V=1\,400$),可见基于所提算法,充/放电决策使得储能设备里的电量始终保持在合理水平,即满足约束式(5),未出现因储能设备容量有限造成电量无法存入而浪费和电量过少即过度放电缩短电池寿命的情况。

为评估所提算法对用户等待时延的影响,将所提算法与“purchase-at-deadline”算法的时延情况进行比较.表 2 同时列出了本文算法和“purchase-at-

deadline”算法的平均时延,可以看出本文算法的充电需求延时等待要远小于“purchase-at-deadline”算法.图 6 显示“purchase-at-deadline”算法的延时等待的时长集中分布在 5, 6, 7 个时隙,而本文算法集中分布在 2 个时隙,“purchase-at-deadline”算法的整体时延大于本文算法.表 3 和表 4 分别列出了依据本文算法和“purchase-at-deadline”算法的时延分布情况.从表 3 中可以发现本文算法中有 29% 的充电需求无需延时等待,而表 4 中另一种算法所有充电需求都需延时等待,充分体现本文算法在充电延时等待上的优越性。

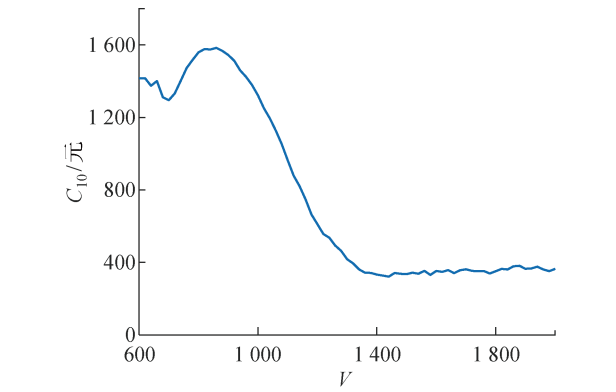


图 4 充电服务商的购电成本随参数 V 变化
Fig. 4 Cost of charging service provider versus parameter V

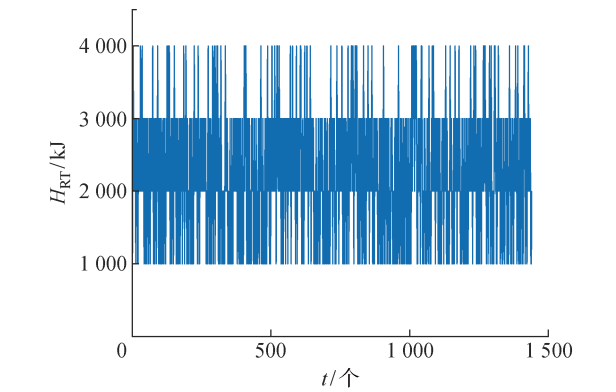


图 5 储能设备中的实时电量
Fig. 5 Real-time amount of energy in energy storage equipment

表 2 平均时延比较
Tab. 2 Comparison of average delay

队列	t/个	
	本文算法	“purchase-at-deadline”算法
一	1.826 4	6.213 9
二	1.288 9	6.224 3
三	1.001 4	5.999 3

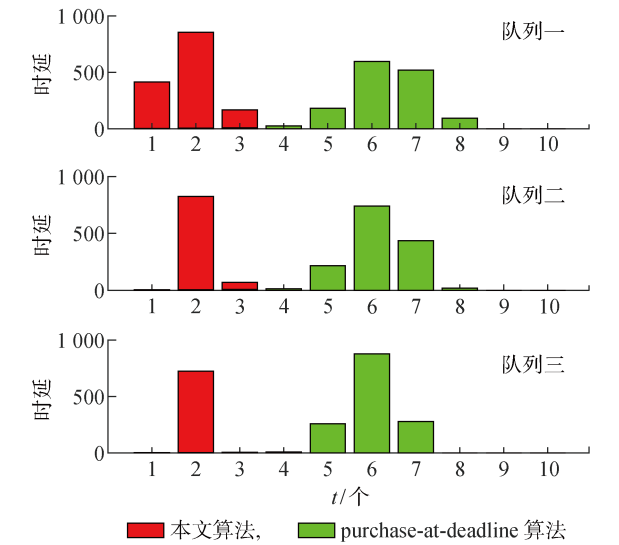


图 6 本文算法与“purchase-at-deadline”算法的时延比较
Fig. 6 Delay comparison of proposed algorithm and ‘purchase-at-deadline’ algorithm

表 3 本文算法时延分布
Tab. 3 Delay distribution of algorithm in this paper

队列	时延				
	t=0	t=1	t=2	t=3	t=4
一	0	422	846	172	0
二	545	0	829	66	0
三	719	0	721	0	0

表 4 “purchase-at-deadline”算法时延分布
Tab. 4 Delay distribution of ‘purchase-at-deadline’ algorithm

队列	时延							
	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6	t=7	t=8
一	4	4	6	31	226	609	470	90
二	4	2	6	10	155	744	494	25
三	4	4	7	10	206	927	282	0

5 结语

本文针对电动汽车充电的随机性和可再生能源出力的不确定性,研究在随机环境下的电动汽车充电调度管理问题,从充电服务商的角度出发,协同可再生能源与储能设备,提出一种基于 Lyapunov 理论优化的电动汽车充电管理与优化控制算法. 充电服务商通过实时控制电动汽车的充电速率、储能设备的充/放电以及与智能电网的双向电力交易量,在满足电动汽车的充电和延时需求的前提下,实现长期平均购电成本最低,从而最大化收益的目标. 仿真结果表明,所提算法并不依赖于可再生能源收集和充电需求的统计分布,在不同参数的设置下购电成本均小于“purchase-at-deadline”贪婪算法,并且有效降低了充电需求的等待时延.

参考文献:

- [1] 吉斌, 孙绘, 梁肖, 等. 面向“双碳”目标的碳电市场融合交易探讨[J]. *华电技术*, 2021, 43(6): 33-40.
JI Bin, SUN Hui, LIANG Xiao, *et al.* Discussion on convergent trading of the carbon and electricity market on the path to carbon peak and carbon neutrality [J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(6): 33-40.
- [2] 何方波, 赵明, 王楷, 等. 考虑需求响应的源荷协调多目标优化方法[J]. *电网与清洁能源*, 2021, 37(10): 51-58.
HE Fangbo, ZHAO Ming, WANG Kai, *et al.* A multi objective optimization method of source load coordination considering demand response [J]. *Power System and Clean Energy*, 2021, 37(10): 51-58.
- [3] 姜海洋, 杜尔顺, 朱桂萍, 等. 面向高比例可再生能源电力系统的季节性储能综述与展望[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(19): 194-207.
JIANG Haiyang, DU Ershun, ZHU Guiping, *et al.* Review and prospect of seasonal energy storage for power system with high proportion of renewable energy [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(19): 194-207.
- [4] 佟晶晶, 温俊强, 王丹, 等. 基于分时电价的电动汽车多目标优化充电策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(1): 17-23.
TONG Jingjing, WEN Junqiang, WANG Dan, *et al.* Multi-objective optimization charging strategy for plug-in electric vehicles based on time-of-use price [J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(1): 17-23.
- [5] 杨健维, 苟方杰, 黄宇, 等. 基于不确定性测度的居民小区电动汽车充电分时电价制定策略[J]. *电网技术*, 2018, 42(1): 96-102.
YANG Jianwei, GOU Fangjie, HUANG Yu, *et al.* Residential area electric vehicle charging pricing strategy based on uncertainty measure [J]. *Power System Technology*, 2018, 42(1): 96-102.
- [6] 赵俊华, 文福拴, 杨爱民, 等. 电动汽车对电力系统的影响及其调度与控制问题[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(14): 2-10.
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, YANG Aimin, *et al.* Impacts of electric vehicles on power systems as well as the associated dispatching and control problem [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(14): 2-10.
- [7] 张博, 唐巍, 蔡永翔, 等. 面向高比例户用光伏消纳的储能系统与通信网络协同规划[J]. *电网技术*, 2018, 42(10): 3161-3169.
ZHANG Bo, TANG Wei, CAI Yongxiang, *et al.* Collaborative configuration of energy storage systems and communication networks for accommodation of high-penetration residential PVs [J]. *Power System Technology*, 2018, 42(10): 3161-3169.
- [8] 胡澄, 刘瑜俊, 徐青山, 等. 面向含风电楼宇的电动汽车优化调度策略[J]. *电网技术*, 2020, 44(2): 564-572.
HU Cheng, LIU Yujun, XU Qingshan, *et al.* Optimal scheduling strategy for electric vehicles in buildings with wind power [J]. *Power System Technology*, 2020, 44(2): 564-572.
- [9] 陈中, 刘艺, 陈轩, 等. 考虑移动储能特性的电动汽车充放电调度策略[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(2): 77-85.
CHEN Zhong, LIU Yi, CHEN Xuan, *et al.* Charging and discharging dispatching strategy for electric vehicles considering characteristics of mobile energy storage [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(2): 77-85.
- [10] 张良, 孙成龙, 蔡国伟, 等. 基于 PSO 算法的电动汽车有序充放电两阶段优化策略[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(5): 1837-1852.
ZHANG Liang, SUN Chenglong, CAI Guowei, *et al.* Two-stage optimization strategy for coordinated charging and discharging of EVs based on PSO algorithm [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(5): 1837-1852.
- [11] 李志伟, 赵书强, 刘应梅. 电动汽车分布式储能控制策略及应用[J]. *电网技术*, 2016, 40(2): 442-450.
LI Zhiwei, ZHAO Shuqiang, LIU Yingmei. Control strategy and application of distributed electric vehicle energy storage [J]. *Power System Technology*, 2016,

40(2): 442-450.

[12] NOUR M, SAID S M, ALI A, *et al.* Smart charging of electric vehicles according to electricity price[C]// **2019 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering**. Aswan, Egypt: IEEE, 2019: 432-437.

[13] JIN C R, SHENG X, GHOSH P. Optimized electric vehicle charging with intermittent renewable energy sources[J]. **IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing**, 2014, 8(6): 1063-1072.

[14] 吴洲洋, 艾欣, 胡俊杰. 电动汽车聚合商参与调频备用的调度方法与收益分成机制[J]. **电网技术**, 2021, 45(3): 1041-1050.

WU Zhouyang, AI Xin, HU Junjie. Dispatching and income distributing of electric vehicle aggregators' participation in frequency regulation[J]. **Power System Technology**, 2021, 45(3): 1041-1050.

[15] WANG W, CHENG Y. Optimal charging scheduling for electric vehicles considering the impact of renewable energy sources[C]// **2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering**. Chengdu, China: IEEE, 2020: 1150-1154.

[16] 王行行, 赵晋泉, 王珂, 等. 考虑用户满意度和配网安全的电动汽车多目标双层充电优化[J]. **电网技术**, 2017, 41(7): 2165-2172.

WANG Xingxing, ZHAO Jinquan, WANG Ke, *et al.* Multi-objective Bi-level electric vehicle charging optimization considering user satisfaction degree and distribution grid security[J]. **Power System Technology**, 2017, 41(7): 2165-2172.

[17] CHENG Q F, CHEN L, SUN Q Y, *et al.* A smart charging algorithm based on a fast charging station without energy storage system[J]. **CSEE Journal of Power and Energy Systems**, 2021, 7(4): 850-861.

[18] 徐智威, 胡泽春, 宋永华, 等. 基于动态分时电价的电动汽车充电站有序充电策略[J]. **中国电机工程学报**, 2014, 34(22): 3638-3646.

XU Zhiwei, HU Zechun, SONG Yonghua, *et al.* Coordinated charging strategy for PEV charging stations based on dynamic time-of-use tariffs[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2014, 34(22): 3638-3646.

[19] 刘迪迪, 林基明, 王俊义, 等. 蜂窝网络中能量收集基站的能量协作算法[J]. **上海交通大学学报**, 2018, 52(3): 365-372.

LIU Didi, LIN Jiming, WANG Junyi, *et al.* The algorithm of energy cooperation in cellular networks with energy-harvesting base stations[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2018, 52(3): 365-372.

[20] NEELY M J. Stochastic network optimization with application to communication and queueing systems [J]. **Synthesis Lectures on Communication Networks**, 2010, 3(1): 1-211.

(本文编辑:孙伟)